

dc_1959_21

Légköri üvegházhatású gázok felszíni mérlegének vizsgálata eddy kovariancia mérések és biogeokémiai modell segítségével

MTA doktori értekezés tézisei

Barcza Zoltán

Budapest, 2022

BEVEZETÉS

A talaj-növény rendszer kiemelt jelentőségű a bioszféra és általában a létezésünk szempontjából. A légkörben jelen lévő szén-dioxid (CO_2) teszi lehetővé, hogy a bioszféra részét képező növényzet szerves anyagot halmozzon fel a CO_2 fotoszintézis útján történő felvételével és átalakításával. Emellett a növényzet létfenntartó folyamatai során, illetve a talajba kerülő szerves anyagok bomlása következtében ugyancsak CO_2 szabadul fel. A légköri CO_2 üvegházhatása révén befolyásolja bolygónk éghajlatát (Lacis et al., 2010; IPCC, 2019, 2021). Ugyanakkor az éghajlat a bioszféra működésének befolyásolása révén visszahat a légköri szén-dioxid szintre. Emiatt a talaj-növény rendszer CO_2 mérlegének megértése alapvető jelentőségű mind az élelmiszer-biztonság, mind az éghajlat szempontjából.

A szárazföldi bioszféra biogeokémiai folyamatait, és azon belül a talaj-növény rendszer CO_2 mérlegét, illetve az azt meghatározó folyamatokat nem ismerjük kielégítő pontossággal. Mivel az éghajlatváltozás már bizonyítottan módosította a szárazföldi bioszféra CO_2 mérlegét, jogos feltételezni, hogy ez a tendencia folytatódni fog (Friedlingstein and Prentice, 2010; Huntzinger et al., 2017). Az éghajlat és a bioszféra közötti kölcsönhatás azt jelenti az ökológiai rendszerek szintjén, hogy CO_2 megkötő képességük nőhet is, de éppenséggel csökkenhet is. Az első esetben beszélhetünk negatív visszacsatolásról, míg a második eset a pozitív visszacsatolás az éghajlati rendszer szempontjából. Ami bizonyos, hogy jelenleg nincs konszenzus azzal kapcsolatban, hogy a megváltozó környezeti feltételek és a légköri CO_2 mennyiség milyen mértékben hatnak egymásra (Ciais et al., 2013; Friedlingstein et al., 2014; Huntzinger et al., 2017; Schwalm et al., 2019; Cox, 2019).

Az éghajlatváltozás előrejelzéséhez kötődő bizonytalanságok csökkentése érdekében nyilvánvalóan bővítenünk kell ismereteinket a bioszférikus szén-dioxid mérleggel kapcsolatban is, globális, regionális és lokális skálán egyaránt. Ez egyrészt hosszú távú mérési programok megvalósításával lehetséges. Emellett a létező biogeokémiai és Föld rendszermodelleket (Earth System Model, azaz a legújabb generációs éghajlati modellek, amelyek csatolt klíma-szén-ciklus modellek; Lenton et al., 2006; Shevliakova et al., 2013) is javítanunk kell.

CÉLKITŰZÉS

Jelen dolgozat célja, hogy bemutassa a bioszférikus CO₂ mérleggel, illetve tágabb értelemben a talaj-növény rendszer üvegházhatású gáz mérlegével kapcsolatos kutatómunkám eredményeit. Egyik fő célkitűzésem az volt, hogy számszerűsítsem egy tipikus magyarországi mezőgazdasági régió, illetve egy kezelt gyepek CO₂ forgalmát. A mérési adatokból kiindulva egy biogeokémiai modell segítségével különböző ökológiai rendszerek, illetve Magyarország bioszférikus CO₂ mérlegét is megbecsültem. Ugyancsak kísérletet tettem Magyarország teljes bioszférikus eredetű üvegházhatású gáz mérlegének becslésére is, hazai és külföldi kollégák eredményeit is szintetizálva. Munkámmal a modell-adat fúzió minél több komponensét próbálom lefedni, ami lehetőséget nyithat a szénmérleg becslésekben rejlő bizonytalanságok csökkentésére.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

Kutatómunkám során az ún. eddy kovariancia mérés technikát felhasználó monitoring program adatai segítségével számszerűsítettem Hegyhátsál település környezetében található vegyes mezőgazdasági terület szénmérlegét. Ugyancsak eddy kovariancia technika alapján becsültem a hegyhátsáli TV adótorony kertjében lévő kvázi-természetes kaszált gyepek szénmérlegét.

Biogeokémiai modellek segítségével becsültem a hegyhátsáli régió illetve a teljes ország szén-, illetve üvegházhatású gáz mérlegét. A modell alkalmazása mellett aktívan részt vettem a modell fejlesztésében, dokumentálásában és közzétételében. A modell alkalmazásához szükség volt egy megfelelő klímaadatbázis létrehozására is, melynek a megtervezésében és megvalósításában részt vettem (FORESEE adatbázis).

A mérések és a modellezés összekapcsolása révén a modell-adat fúzió hazai alkalmazását valósítottam meg.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

1. Egyedülálló, 23 éves adatsort származtattam a hegyhátsáli magas torony alapú eddy kovariancia mérés alapján a talaj/növény rendszer szénmérlegének komponenseire a főképp szántóföldekre reprezentatív mérés alapján (ebből az első 21 év adatsora van bemutatva és publikálva). Az idősor világviszonylatban is egyedi, kevés hasonló magas torony alapú adatsor létezik. A 3 méter magasságban üzemelő második eddy kovariancia mérés alapján 14

év adatsorát származtattam kaszált gyepre vonatkozóan (némely év csonka, de modellezési célból kiválóan alkalmazható). N_2O fluxus kapcsán jelenleg 5 és fél év adata áll rendelkezésre (2 év adata lett ebből publikálva). Ily módon összesen 42,5 állomás-év adatsorát származtattam a nyers eddy kovariancia adatokból munkásságom során. Az adatsor egy része publikusan elérhető a *European Fluxes Database Cluster* adatbázisában.

2. Megmutattam, hogy a magas torony alapú eddy kovariancia mérés térbeli reprezentativitása legalább megyei szintű ($\sim 1600 \text{ km}^2$), így alkalmas általánosításra. A nagy reprezentativitás révén nyílt lehetőség a megyei szintű termésátlagok használatára a nettó biom produkció (NBP) vonatkozásában, amihez szükség volt a horizontálisan elszállított szén mennyiségének a származtatására. A vizsgált időszakban az átlagosan elszállított szén mennyisége a hegyhátsági régióban 201 gC/m^2 volt. A termésátlag adatok és a hegyhátsági NEE mérések kombinálása új módszertani eredmény.

3. Becslést adtam a hegyhátsági régió szénmérlegének főbb komponenseire, köztük az NEE-re és az NBP-re is. A sok éves átlagos NEE $-170 \text{ gC/m}^2/\text{év}$, míg az NBP kb. $-20 \text{ gC/m}^2/\text{év}$ volt a vizsgált 1997–2018 időszakban. Az adatsorban tendencia azonosítható, és úgy tűnik, a produktívabb években a NBP egyre inkább pozitívabb (szénmegkötés a talajban). Az eredmények azt sugallják, hogy a mezőgazdasági művelés nem feltétlenül jár a talaj szénkészletének lassú kimerülésével a változó éghajlat ellenére.

4. Módszertani fejlesztést végeztem az eddy kovariancia alapú mérések éves szénmérleg komponenseinek az elemzésére vonatkozóan. Kritikus időszak elemzés módszertan alapján konkrét időszakok konkrét környezeti változói alapján magyaráztam az eredmények évek közötti változékonyságát. A módszer segítségével bizonyos időszakok hozzájárulása becsülhető az összesített szénáramhoz (NEP). Egyszerű egyenlet formájában közöltem a vonatkozó statisztikai modellt. A módszertan alapján könnyen értelmezhető a 2001–2003-as időszak anomáliája, amikor az NEE a mérések szerint pozitív volt (nettó szén kibocsátó a horizontális szénáramok figyelembe vétele nélkül). Az eredmények alapján az áprilisi meteorológiai paraméterek (maximum hőmérséklet, VPD, sugárzás) anomáliája, illetve a talajnedvesség anomáliája együttesen okozta az NEE előjelváltását. Az eredmények szerint nemcsak a hóhullámmal társult szárazság, hanem egyéb meteorológiai paraméterek is meghatározó szerepet játszottak a jelenség kialakulásában.

5. Kezdeményeztem a Biome-BGC biogeokémiai modell hazai adaptálását, emellett részt vettem és jelenleg is aktívan részt veszek a Biome-BGCMuSo modell fejlesztésében, ami a Biome-BGC egy továbbfejlesztett változata. A Biome-BGCMuSo ma már egy rugalmas és korszerű biogeokémiai modellnek számít, ami mezőgazdasági modellezés céljára is használható. A modell nyílt forráskódú közzététele és a szoftver támogatása is a közreműködésemmel zajlik. A modell a <http://nimbus.elte.hu/bbgc> honlapon érhető el. A modell kapcsán számos szakcikk született, és több nemzetközi együttműködést is indukált, elősegítve ezzel a hazai kutatók beágyazódását a nemzetközi hálózatokba.

6. Erdős, gyepes, és szántóföldi ökoszisztémák esetén is részt vettem multimodell megközelítést alkalmazó együttműködésben a Biome-BGC illetve a Biome-BGCMuSo modell kapcsán. Tevékenységgemmel megalapoztam a hazai *ensemble* alapú biogeokémiai modellezést. Meghatározó kutatóként részt vettem a világviszonylatban is elsőnek számító gyepes multimodell összehasonlító projektben (JPI-FACCE MACSUR; ahol a modell alkalmazásában, és az eredmények értékelésében is meghatározó szerepem volt).

7. Elsőként származtattam folyamat-orientált biogeokémiai modell segítségével szénmérleg becslést teljes Magyarországra vonatkozóan, több komponensre. Ráműtattam a becslés pontatlanságára a mezőgazdasági területek kapcsán. Módszertani fejlesztést végeztem a mérleg pontosítására, ahol felhasználtam a hegyhátsági magas torony alapú mérések eredményeit is.

8. Széles körű adatgyűjtés és szintézis alapján becslést adtam a hazai gyepek, szántóföldek, erdők, valamint az egész ország teljes bioszférikus üvegházhatású gáz (ÜHG) mérlegére vonatkozóan. A közölt adatsor adja meg az első sarokpontot a nem IPCC módszert használó ÜHG mérleg becslések kapcsán az országra vonatkozóan. Az eredményeket 1 m^2 felületre is származtattam a könnyű értelmezhetőség kedvéért. Ezen logika átvételét javaslom a hasonló kutatások kapcsán, elkerülendő a megatonnákbán és gigagrammokban kifejezett, kevésbé értelmezhető eredményeket.

9. Az eddy kovariancia mérések feldolgozása és értelmezése révén, az eredmények modellezés központú alkalmazásával, illetve a Biome-BGCMuSo modell köré kialakított komplex informatikai környezet révén meghatározó szerepem van a légköri üvegházhatású

gázokkal kapcsolatos modell-adat fúzió első hazai gyakorlati alkalmazásában. A modell-adat fúzió hozzájárul a becslések pontosításához, és a segítségével készített szimulációs eredmények a globális modellekkel ellentétben a hazai viszonyokat jobban tükrözik.

10. Kezdeményezésemre jött létre a publikus FORESEE adatbázis, mely meteorológiai adatokat tartalmaz az éghajlatváltozással összefüggő hatásvizsgálatok támogatására. A FORESEE Magyarországon egyedülálló módon ötvözi a megfigyeléseket és a hibakorrigált regionális klímamodell eredményeket. Kezdeményezésemre csapadék frekvencia korrekciót is alkalmaztunk a projektált adatokon. A FORESEE folyamatos fejlesztés alatt áll, és közvetlenül képes kiszolgálni a Biome-BGC és Biome-BGCMuSo meteorológiai adatigényét.

HIVATKOZOTT IRODALOM

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Cox, P.M., 2019. Emergent Constraints on Climate-Carbon Cycle Feedbacks. *Current Climate Change Reports*, 5, 275–281. doi:10.1007/s40641-019-00141-y

Friedlingstein, P., Prentice, I.C., 2010. Carbon-climate feedbacks: A review of model and observation based estimates. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 251–257. doi:10.1016/j.cosust.2010.06.002

Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., and Knutti, R., 2014. Uncertainties in CMIP5 Climate Projections due to Carbon Cycle Feedbacks. *Journal of Climate*, 27, 511-526. doi:10.1175/JCLI-D-12-00579.1

Huntzinger, D.N., Michalak, A.M., Schwalm, C., Ciais, P., King, A.W., Fang, Y., Schaefer, K., Wei, Y., Cook, R.B., Fisher, J.B., Hayes, D., Huang, M., Ito, A., Jain, A.K., Lei, H., Lu, C., Maignan, F., Mao, J., Parazoo, N., Peng, S., Poulter, B., Ricciuto, D., Shi, X., Tian, H., Wang, W., Zeng, N., Zhao, F., 2017. Uncertainty in the response of terrestrial carbon sink to environmental drivers undermines carbon-climate feedback predictions. *Scientific Reports*, 7, 4765.

IPCC, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)].

IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

Lacis, A.A., Schmidt, G.A., Rind, D., Ruedy, R.A., 2010. Atmospheric CO₂: Principal control knob governing earth's temperature. *Science*, 330, 356–359. doi:10.1126/science.1190653

Lenton, T.M., Williamson, M.S., Edwards, N.R., Marsh, R., Price, A.R., Ridgwell, A.J., Shepherd, J.G., Cox, S.J., 2006. Millennial timescale carbon cycle and climate change in an efficient Earth system model. *Climate Dynamics*, 26, 687–711. doi:10.1007/s00382-006-0109-9

Schwalm, C.R., Schaefer, K., Fisher, J.B., Huntzinger, D., Elshorbany, Y., Fang, Y., Hayes, D., Jafarov, E., Michalak, A.M., Piper, M., Stofferahn, E., Wang, K., Wei, Y., 2019. Divergence in land surface modeling: linking spread to structure. *Environmental Research Communications*, 1, 111004. doi:10.1088/2515-7620/ab4a8a

Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Malyshev, S., Krasting, J.P., Hurtt, G.C., Pacala, S.W., 2013. Historical warming reduced due to enhanced land carbon uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 16730-5. doi: 10.1073/pnas

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

Bakwin, P. S., Davis, K. J., Yi, C., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Haszpra, L., Barcza, Z., 2004. Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data. *Tellus B*, 56, 301-311.

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S. and Bartholy, J., 2003. Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus* 55B, 187-196.

Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Churkina, G., Horváth, L., 2008. Magyarország bioszférikus szén-dioxid mérlegének becslése. "Klíma-21 füzetek", Klímaváltozás-Hatások-Válaszok, 52, 83-91.

Barcza, Z., Kern, A., Haszpra, L., Kljun, N., 2009a. Spatial representativeness of tall tower eddy covariance measurements using remote sensing and footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 795-807. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.10.021

Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Lovas, K., Churkina, G., Horváth, L., 2009b. Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 113, 203-219.

Barcza, Z., Bondeau, A., Churkina, G., Ciais, Ph., Czóbel, Sz., Gelybó, Gy., Grosz, B., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Machon, A., Pásztor, L., Somogyi, Z., Van Oost, K., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Model based biospheric greenhouse gas balance of Hungary. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 295-330. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Barcza, Z., Kern, A., Davis, K.J., Haszpra, L., 2020. Analysis of the 21-years long carbon dioxide flux dataset from a Central European tall tower site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, article 108027. doi:10.1016/j.agrformet.2020.108027

Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Havasi, Á., Horváth, F., Ittész, P. and Bartholy, J., 2015. Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience Data Journal*, 2, 1-11. doi:10.1002/gdj3.22

Farkas, Cs., Alberti, G., Balogh, J., Barcza, Z., Birkás, M., Czóbel, Sz., Davis, K. J., Führer, E., Gelybó, Gy., Grosz, B., Kljun, N., Koós, S., Machon, A., Marjanović, H., Nagy Z., Peresotti, A., Pintér, K., Tóth, E., Horváth, L., 2010. Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Methodologies. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 65-90. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Fodor, N., Pásztor, L., Szabó, B., Laborczi, A., Pokovai, K., Hidy, D., Hollós, R., Kristóf, E., Kis, A., Dobor, L., Kern, A., Grünwald, T., Barcza, Z., 2021. Input database related uncertainty of Biome-BGCMuSo agro-environmental model outputs. *International Journal of Digital Earth*, 14, 1582–1601. doi:10.1080/17538947.2021.1953161

Gelybó, Gy., Barcza, Z., Kern, A., Kljun, N., 2013. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174-175, 43-53. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003

Gilmanov, T.G., Soussana, J.F., Aires, L., Allard, V., Ammann, C., Balzarolo, M., Barcza, Z., Bernhofer, C., Campbell, C. L., Cernusca, A., Cescatti, A., Clifton-Brown, J., Dirks, B.O.M., Dore, S., Eugster, W., Fuhrer, J., Gimeno, C., Gruenwald, T., Haszpra, L., Hensen, A., Ibrom, A., Jacobs, A.F.G., Jones, M.B., Lanigan, G., Laurila, T., Lohila, A., Manca, G., Marcolla, B., Nagy, Z., Pilegaard, K., Pintér, K., Pio, C., Raschi, A., Rogiers, N., Sanz, M. J., Stefani, P., Sutton, M., Tuba, Z., Valentini, R., Williams, M.L., Wohlfahrt, G., 2007. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121/1-2, 93-120. doi: doi:10.1016/j.agee.2006.12.008

Gilmanov, T.G., Aires, L., Barcza, Z., Baron, V.S., Beilelli, L., Beringer, J., Billesbach, D., Bonal, D., Bradford, J., Ceschia, E., Cook, D., Corradi, C., Frank, A., Gianelle, D., Gimeno, C., Gruenwald, T., Guo, H., Hanan, N., Haszpra, L., Heilman, J., Jacobs, A., Jones, M.B., Johnson, D.A., Kiely, G., Li, S., Magliulo, V., Moors, E., Nagy, Z., Nasyrov, M., Owensby, C., Pinter, K., Pio, C., Reichstein, M., Sanz, M.J., Scott, R., Soussana, J.F., Stoy, P.C., Svejcar, T., Tuba, Z. and Zhou, G., 2010. Productivity, respiration, and light-response parameters of world grassland and agroecosystems derived from flux-tower measurements. *Rangeland Ecology and Management*, 63, 16-39. doi: 10.2111/REM-D-09-00072.1

Hardisty, A.R., Bacall, F., Beard, N., Balcázar-Vargas, M.-P., Balech, B., Barcza, Z., Bourlat, S.J., De Giovanni, R., de Jong, Y., De Leo, F., Dobor, L., Donvito, G., Fellows, D., Guerra, A.F., Ferreira, N., Fetyukova, Y., Fosso, B., Giddy, J., Goble, C., Güntsch, A., Haines, R., Ernst, V.H., Hettling, H., Hidy, D., Horváth, F., Itzész, D., Itzész, P., Jones, A., Kottmann, R., Kulawik, R., Leidenberger, S., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Mathew, C., Morrison, N., Nenadic, A., de la Hidalgo, A.N., Obst, M., Oostermeijer, G., Paymal, E., Pesole, G., Pinto, S., Poigné, A., Fernandez, F.Q., Santamaria, M., Saarenmaa, H., Sipos, G., Sylla, K.-H., Tähtinen, M., Vicario, S., Vos, R.A., Williams, A.R., Yilmaz, P., 2016. BioVeL: a virtual laboratory for data analysis and modelling in biodiversity science and ecology. *BMC Ecology*, 16, 49. doi:10.1186/s12898-016-0103-y.

Haszpra, L. és Barcza, Z., 2005. A magyarországi légköri szén-dioxid mérések szerepe az éghajlati modellek megalapozásában. "Agro-21" füzetek, Klímaváltozás-Hatások-Válaszok. 38, 13-26.

Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K. J., Tarczay, K., 2005. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 58-77. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.002

Haszpra, L., and Barcza, Z., 2010. Climate variability as reflected in a regional atmospheric CO₂ record. *Tellus B*, 62, 417-426. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00505.x

Haszpra, L., Hidy, D., Taligás, T., Barcza, Z., 2018. First results of tall tower based nitrous oxide flux monitoring over an agricultural region in Central Europe. *Atmospheric Environment*, 176, 240–251. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.12.035

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Trusilova, K., 2007. Parameter estimation for grassland carbon cycle using nonlinear inversion of Biome-BGC. *Cereal Research Communications*, 35, 453-456. doi: 10.1556/CRC.35.2007.2.72

Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Vermeulen, A., Tuba, Z. and Nagy, Z., 2009. Modelling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica* 47, 457-470. doi: 10.1007/s11099-009-0070-z

Hidy, D., Machon, A., Haszpra, L., Nagy, Z., Pintér, K., Churkina, G., Grosz, B., Horváth L., Barcza, Z., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 229-251. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., Nagy, Z., 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling*, 226, 99-119. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008

Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M. Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Nagy, Z., 2016. Terrestrial Ecosystem Process Model Biome-BGCMuSo v4.0: Summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9, 4405-4437. doi:10.5194/gmd-9-4405-2016

Hlásny, T., Barcza, Z., Fabrika, M., Balázs, B., Churkina, G., Pajtík, J., Sedmák, R., Turčáni, M., 2011. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, 47, 219-246. doi:10.3354/cr01024

Hlásny, T., Barcza, Z., Barka, I., Merganičová, K., Sedmák, R., Kern, A., Pajtík, J., Balázs, B., Fabrika, M., Churkina, G., 2014. Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management*, 328, 55-68. doi:10.1016/j.foreco.2014.04.038

Hlásny, T., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Barka, I., 2016. Future climate of the Carpathians: climate change hot-spots and implications for ecosystems. *Regional Environmental Change*, 16, 1495-1506. doi:10.1007/s10113-015-0890-2

Kern, A., Barcza, Z., Marjanović, H., Árendás, T., Fodor, N., Bónis, P., Bognár, P., Lichtenberger, J., 2018. Statistical modelling of crop yield in Central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 300-320. doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.009

Nagy, Z., Barcza, Z., Horváth, L., Balogh, J., Hagyó, A., Káposztás, N., Grosz, B., Machon, A., Pintér, K., 2010. Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 91-119. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Ostrogović Sever, M.Z.O., Barcza, Z., Hidy, D., Kern, A., Dimoski, D., Miko, S., Hasan, O., Grahovac, B., Marjanović, H., 2021. Evaluation of the Terrestrial Ecosystem Model Biome-BGCMuSo for Modelling Soil Organic Carbon under Different Land Uses. *Land*, 10, 968. doi:10.3390/land10090968

Salma, I., Thén, W., Aalto, P., Kerminen, V.-M., Kern, A., Barcza, Z., Petäjä, T., Kulmala, M., 2021. Influence of vegetation on occurrence and time distributions of regional new aerosol particle formation and growth. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2861–2880. doi:10.5194/acp-21-2861-2021

Sándor, R., Barcza, Z., Hidy, D., Lellei-Kovács, E., Ma, S. and Bellocchi, G., 2016. Modelling of grassland fluxes in Europe: evaluation of two biogeochemical models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 1–19, doi:10.1016/j.agee.2015.09.001, 2016.

Sándor, R., Barcza, Z., Acutis, M., Doro, L., Hidy, D., Köchy, M., Minet, J., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Perego, A., Rolinski, S., Ruget, F., Sanna, M., Seddaiu, G., Wu, L., Bellocchi, G., 2017. Multi-model simulation of soil temperature, soil water content and biomass in Euro-Mediterranean grasslands: Uncertainties and ensemble performance. *European Journal of Agronomy*, 88, 22–40. doi:10.1016/j.eja.2016.06.006

Tóth, E., Barcza, Z., Birkás, M., Gelybó, Gy., Zsembeli, J., Bottlik, L., Davis, K. J., Haszpra, L., Kern, A., Kljun, N., Koós, S., Kovács, Gy., Stingli, A., Farkas, Cs., 2010: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Arable lands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 157-197. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Yi, C., Ricciuto, D., Li, R., Wolbeck, J., Xu, X., Nilsson, M., Aires, L., Albertson, J.D., Ammann, C., Arain, M.A., de Araujo, A.C., Aubinet, M., Aurela, M., Barcza, Z., Barr, A., Berbigier, P., Beringer, J., Bernhofer, C., Black, A.T., Bolstad, P.V., Bosveld, F.C., Broadmeadow, M.S.J., Buchmann, N., Burns, S.P., Cellier, P., Chen, J., Chen, J., Ciais, P., Clement, R., Cook, B.D., Curtis, P.S., Dail, D.B., Dellwik, E., Delpierre, N., Desai, A.R., Dore, S., Dragoni, D., Drake, B.G., Dufrene, E., Dunn, A., Elbers, J., Eugster, W., Falk, M., Feigenwinter, C., Flanagan, L.B., Foken, T., Frank, J., Fuhrer, J., Gianelle, D., Goldstein, A., Goulden, M., Granier, A., Grünwald, T., Gu, L., Guo, H., Hammerle, A., Han, S., Hanan, N.P., Haszpra, L., Heinesch, B., Helfter, C., Hendriks, D., Hutley, L.B., Ibrom, A., Jacobs, C., Johansson, T., Jongen, M., Katul, G., Kiely, G., Klumpp, K., Knohl, A., Kolb, T., Kutsch, W.L., Lafleu, P., Laurila, T., Leuning, R., Lindroth, A., Liu, H., Loubet, B., Manca, G.,

Marek, M., Margolis, H.A., Martin, T.A., Massman, W.J., Matamala, R., Matteucci, G., McCaughey, H., Merbold, L., Meyers, T., Migliavacca, M., Miglietta, F., Misson, L., Molder, M., Moncrieff, J., Monson, R.K., Montagnani, L., Montes-Helu, M., Moors, E., Moureaux, C., Mukelabai, M.M., Munger, J.W., Myklebust, M., Nagy, Z., Noormets, A., Oechel, W., Oren, R., Gpallardy, S., Tha Paw U, K., Pereira, J.S., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Pita, G., Powell, T.L., Rambal, S., Randerson, J.T., Von Randow, C., Rebmann, C., Rinne, J., Rossi, F., Roulet, N., Ryel, R.J., Sagerfors, J., Saigusa, N., Sanz, M.J., Mugnozza, G.-S., Schmid, H.P., Seufert, G., Siqueira, M., Soussana, J.-F., Starr, G., Sutton, M.A., Tenhunen, J., Tuba, Z., Tuovinen, J.-P., Valentini, R., Vogel, C.S., Wang, J., Wang, S., Wang, W., Welp, L.R., Wen, X., Wharton, S., Wilkinson, M., Williams, C.A., Wohlfahrt, G., Yamamoto, S., Yu, G., Zampedri, R., Zhao, B., Zhao, X., 2010. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. *Environmental Research Letters*, 5, 034007. doi:10.1088/1748-9326/5/3/034007